干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

塔里木河下游生态输水对植被碳源/汇空间格局的影响

王 川[1,2]， 刘永昌[1,2]， 李 稚[1]

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所,荒漠与绿洲生态国家重点实验室,
新疆 乌鲁木齐 830011； 2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要: 基于2000年以来塔里木河下游生态输水资料、气象数据、土地利用/覆被变化数据等,结合修正的CASA(Carnegie-Ames-Stanford approach)模型和土壤微生物呼吸模型(Heterotrophic respiration, R_H)估算了2001—2019年植被净生态系统生产力(Net ecosysterm productivity,NEP),分析了植被碳源/汇空间分布变化,探讨了塔里木河下游生态输水对植被碳源/汇变化的影响。结果表明:(1) 随着2000年以来塔里木河下游生态输水,下游退化的生态系统有一定程度的恢复,植被碳汇区域呈现扩大的趋势。2001—2019年NEP以0.541 g C·m^{-2}·a^{-1}的速率呈现上升趋势,其中夏季增加速率最大,为0.406 g C·m^{-2}·a^{-1},增加的区域主要位于大西海子水库北部、英苏、博孜库勒湿地、喀尔达依湿地以及台特玛湖。碳汇面积从2001年的71 km^{2}增加至2019年的355 km^2,增加了4倍。(2) 在季节变化上,夏季碳汇面积为109 km^2,在四季中占比最大,春秋次之,冬季无明显碳汇面积。(3) 塔里木河下游生态系统碳汇面积变化次序为:草地>林地>耕地>未利用地>水域>建设用地。此外,林地和草地年平均变化率最高,分别为2.69 km^2·a^{-1}和3.57 km^2·a^{-1}。生态输水量与碳汇面积有很好的线性关系,碳汇面积变化存在约1 a的滞后效应。

关 键 词: 生态输水; 碳源/汇; 净生态系统生产力(NEP); 塔里木河下游

文章编号:

新疆塔里木河是我国最大的内陆河,被誉为南疆人民的"母亲河"[1-2],流域干旱的自然环境决定了极端脆弱的生态条件[3-4]。在大规模的水土资源开发的持续影响下,20世纪70年代,塔里木河干流下游约400 km河道出现断流和干涸[5-6]。地下水位下降,沿河两岸的胡杨林大面积死亡,荒漠河岸林生态系统严重受损,濒临崩溃,尾闾台特玛湖干涸,湿地一度消失,危及绿洲经济的健康发展[7]。在此背景下,国务院批复开展塔里木河流域综合治理[8],自2000年起,先后向塔里木河下游生态输水21次,累计下泄生态水量约84.45×10^8 m^3,水头16次到达台特玛湖,缓解并遏制了生态环境恶化[9]。

究其生态输水后的生态效益如何,不同学者就断流河道生态输水前后的生态系统变化[10-11]、绿洲演变对生态输水的响应[12]、生态输水对植物群落的影响[13-14]、地下水埋深变化及地下水转化[15-17]等方面做了相应的研究。得出了部分重要结论:随着生态输水的进行,塔里木河下游地下水位不断抬升,植被响应的范围也随之扩大,天然植被有一定程度的恢复,绿洲面积总体处于增加态势[18-19],植物群落稳定性稳步提高。

系统梳理生态输水产生的生态效益研究发现,针对塔里木河下游生态输水前后的生态系统碳源/汇空间变化研究较少,而研究区属于温度大陆性气候,年降水量仅17.4~42.0 mm,年蒸发潜势高达2500~3000 mm,降水与蒸发具有强烈反差[14]。生态环境极为脆弱,生态输水可以直接有效地改善塔里木河下游脆弱的生态环境,引起植被恢复和绿洲面积增加,使得碳源区域向碳汇区域转变。定量评估陆地生态系统碳源/汇的变化是地球系统碳循环监

收稿日期: 2021-02-07; **修订日期:** 2021-03-22
基金项目: 国家重点研发计划(2019YFA0606902);科技部科技基础资源调查专项(2019FY100203)
作者简介: 王川(1997-),男,硕士,主要从事干旱区生态变化研究. E-mail: wangchuan201@mails.ucas.ac.cn
通讯作者: 李稚(1987-),女,博士,研究员,主要从事水循环与生态水文过程研究. E-mail: liz@ms.xjb.ac.cn

测的重要一环[20]。植被净初级生产力(NPP)与土壤微生物呼吸量(R_H)之差被定义为净生态系统生产力(NEP),NEP能够准确预估区域尺度上的碳源/汇变化。因此,本文基于CASA模型,土壤微生物呼吸模型(R_H)估算分析了近20 a塔里木河下游NEP的变化,在此基础上,探讨了塔里木河下游生态输水对植被碳源/汇时空格局的影响,为塔里木河流域生态恢复、保护管理决策提供科学依据。

1 研究区、数据与方法

1.1 研究区概况

塔里木河下游(图1)位于塔克拉玛干沙漠和库鲁克沙漠之间,河岸两边有大片的荒漠河岸林阻止两大沙漠合拢[21],研究区始于大西海子水库,途径其文阔尔河、老塔里木河,而后汇入台特玛湖。在英苏和阿拉干生态断面之间育有喀尔达依湿地和博孜库勒湿地。该区属典型的大陆性干旱气候,年降水量仅17.4~42.0 mm,年蒸发潜势高达2500~3000 mm,降水与蒸发具有强烈反差。年平均气温10.7~11.5 ℃,年较差达35.7~35.9 ℃,生态环境极为脆弱[21]。

1.2 数据来源与处理

归一化植被指数(NDVI)数据:选自美国国家航空航天局(NASA,http://ladsweb.nascom.nasa.gov//date/search.html)的MOD13Q1,时间跨度为2001—2019年,时间分辨率为16 d,空间分辨率为250 m×250 m。由于传感器性能、天气等随机因素的干扰NDVI数据存在噪声影响,借助于ArcMap对数据进行预处理降噪并合成各时间尺度数据集。

气象数据:来源于中国气象数据网(https://data.cma.cn/)时间跨度为2001—2019年,为了与NDVI数据集精度相匹配,将月气温、月降水、月总太阳辐射通过反距离加权插值(IDW)进行空间插值,并统一重采样为250 m×250 m分辨率的栅格数据,同时投影信息保持一致,以便后续模型的运算。

其他数据:2000—2020年21次塔里木河下游生态输水资料。土地利用/覆被变化数据来源于中国科学院资源与环境科学数据中心(http://www.resdc.cn/),本文所用到的为6个一级类型分类[22]。其他地理数据来源于地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)。

1.3 研究方法

1.3.1 净生态系统生产力的计算 净生态系统生产力(NEP)是区域上碳平衡估算的重要指标,通常被

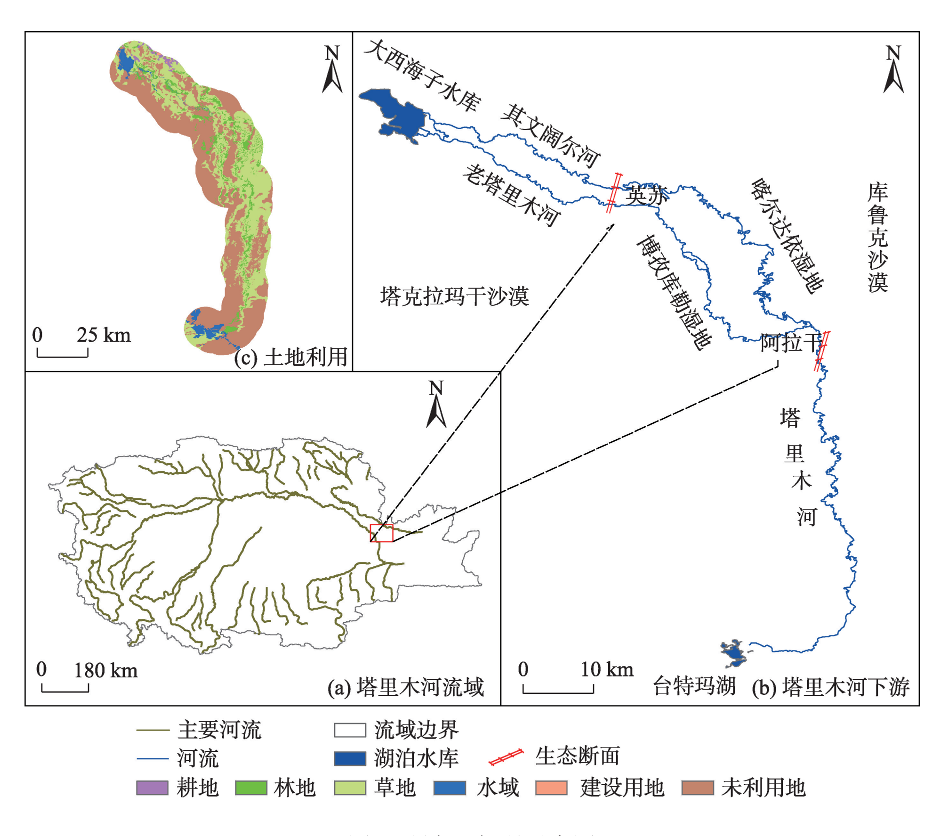


图1 研究区概况示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

用来估算区域尺度上的碳源汇大小。当NEP>0，表示植被碳储量大于土壤微生物呼吸排放的碳，表现为碳汇；NEP<0，表示土壤微生物呼吸排放的碳大于植被碳储量，表现为碳源，其表达式为：

$$\mathrm{NEP}=\mathrm{NPP}-R_{\mathrm{H}} \tag{1}$$

1.3.2 CASA模型 NPP通过CASA模型进行估算，它是光能利用模型，通过气象数据和遥感数据计算，由Potter在1993年提出[23]。本文采用修正的CASA模型估算NPP，输入的数据包括月均温、月降水、月太阳辐射、植被类型及NDVI，表达式为[24-25]：

$$\mathrm{NPP}(x,t)=\mathrm{SOL}(x,t)\times\mathrm{FPAR}(x,t)\times0.5\times T_{\varepsilon1}(x,t)\times T_{\varepsilon2}(x,t)\times W_{\varepsilon}(x,t)\times\varepsilon_{\max} \tag{2}$$

$$\mathrm{FPAR}(x,t)=\begin{cases}0 & \mathrm{NDVI}\le0.075\\ \min\{1.16\times\mathrm{NDVI}(x,t)-0.0439,0.9\} & \mathrm{NDVI}>0.075\end{cases} \tag{3}$$

$$W_{\varepsilon}(x,t)=0.5+0.5\times E(x,t)/E_{\mathrm{p}}(x,t) \tag{4}$$

式中：$\mathrm{SOL}(x,t)$表示太阳总辐射，参照和清华等[26]研究的用天文辐射为起始值的西部公式求取；$\mathrm{FPAR}(x,t)$为植被层对入射光合有效辐射的吸收比例[25]；$T_{\varepsilon1}(x,t)$和$T_{\varepsilon2}(x,t)$表示低温和高温对光利用率的胁迫作用[27]；$W_{\varepsilon}(x,t)$是水分胁迫影响系数[27]；$\varepsilon_{\max}$是理想条件下的最大光能利用率[27]；$E(x,t)$是研究区域的实际蒸散量；$E_{\mathrm{p}}(x,t)$为研究区域的潜在蒸散量[27]。

1.3.3 土壤微生物呼吸模型 利用研究区内铁干里克和若羌2个气象站点，采用反距离加权插值（IDW）分别对月降水和月气温进行插值处理，以经验模型估算[28]，最后利用栅格计算器得出年际平均和四季平均。前人将其应用于西北干旱区和甘肃省取得了较为理想的结果[29]，以此说明此模型在本研究区的适用性。计算公式如下：

$$R_{\mathrm{H}}=0.22\times[\exp(0.0912T)+\ln(0.3145P+1)]\times30\times46.5\% \tag{5}$$

式中：T为月均气温（℃）；P为月均降水量（mm）。

1.3.4 趋势分析 本文采用一元线性回归方法对塔里木河下游NEP进行逐年逐像元回归分析，计算NEP的年际变化规律。趋势分析可以很好的表征NEP的年际变化特征，并且能在一定程度上消除异常因素对NEP变化的影响[29-30]，达到平衡异常值或突变值的效果，真实客观的反映长时间序列NEP的时空变化。计算公式如下：

$$\mathrm{Slope}=\frac{n\times\sum_{i=1}^{n}i\times\mathrm{NEP}_i-\sum_{i=1}^{n}i\sum_{i=1}^{n}\mathrm{NEP}_i}{n\times\sum_{i=1}^{n}i^2-\left(\sum_{i=1}^{n}i\right)^2} \tag{6}$$

式中：Slope为线性拟合方程的斜率；n=19，表示需要回归的年份数；NEP_i表示通过最大值合成的需要回归的第i年NEP值，i表示年份。Slope为正表明NEP在年际回归处于上升趋势，Slope为负表明NEP在年际回归处于下降趋势。

2 结果与分析

2.1 塔里木河下游NEP时空变化特征

2.1.1 年际变化 根据2001—2019年塔里木河下游NEP空间分布特征，发现NEP空间格局受水分条件影响，在大西海子水库东部和东南部以及英苏东南部等水分条件较好的地区NEP值较高，而其他地区NEP值较低（图2a）。NEP多年平均值为−87.66 g C·m^{-2}·a^{-1}，NEP最小距平值出现在2002年，为−17.91 g C·m^{-2}·a^{-1}，最大距平值出现在2013年，为18.20 g C·m^{-2}·a^{-1}（图2c）。2010年后NEP波动性逐渐增大。近20 a来，塔里木河下游NEP整体呈现上升趋势，平均变化速率为0.541 g C·m^{-2}·a^{-1}，主要分布于博孜库勒湿地、喀尔达依湿地以及台特玛湖附近，这些地区靠近水体，而其他地区，NEP大多呈现降低趋势（图2b）。

2.1.2 季节变化 塔里木河下游各季节NEP均值空间分布与年际NEP趋势有较大一致性（图3）。具体而言，NEP增加的地区主要位于大西海子水库东部和东南部以及英苏东南部等地区，而其他远离水体地区NEP多为降低状态。特别是在夏季NEP均值较大，春、秋季NEP分布规律与夏季相似但其值较小，而冬季NEP均值为负。各季节NEP的贡献率依次为夏>秋>春>冬。

从变化趋势可以发现（图4），2001—2019年塔里木河下游秋季和夏季NEP整体呈现上升趋势，平均变化速率分别为0.057 g C·m^{-2}·a^{-1}和0.406 g C·m^{-2}·a^{-1}，增加面积占比分别为56.02%和58.73%，主要分布于大西海子水库北部、英苏、博孜库勒湿地、喀尔达依湿地以及台特玛湖。春季和冬季NEP则呈现下降趋势，平均变化速率分别为−0.022 g C·m^{-2}·a^{-1}和−0.154 g C·m^{-2}·a^{-1}，减少面积占比分别为67.91%和100%。春季NEP仅在喀尔达依湿地和台特玛湖附近呈现增长趋势。

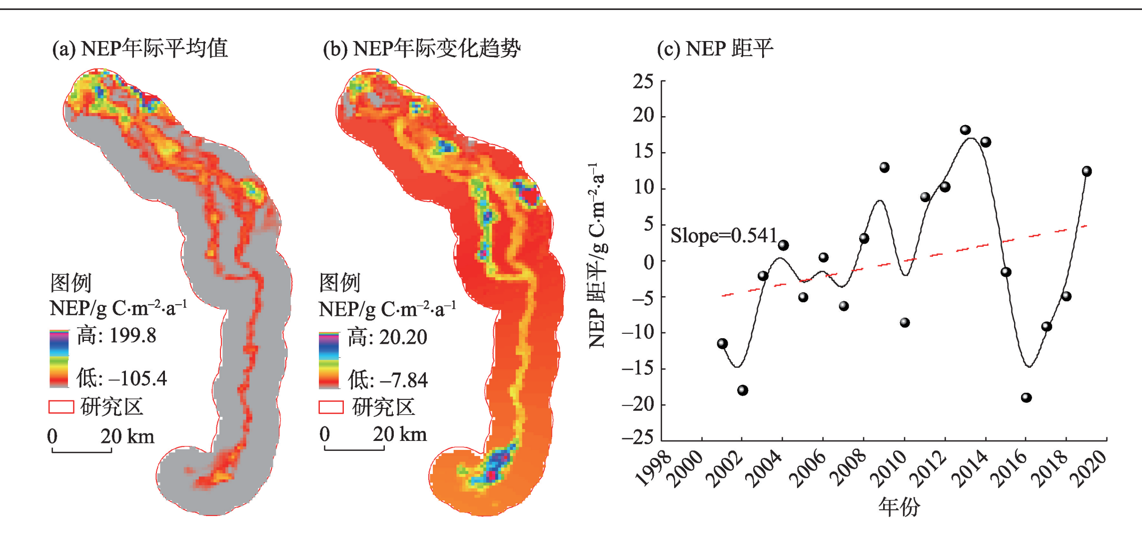


图2 2001—2019年净生态系统生产力(NEP)均值、变化趋势空间分布及时间变化

Fig. 2 Spatial distributions of the mean value and change trend of NEP, and time change of NEP from 2001 to 2019

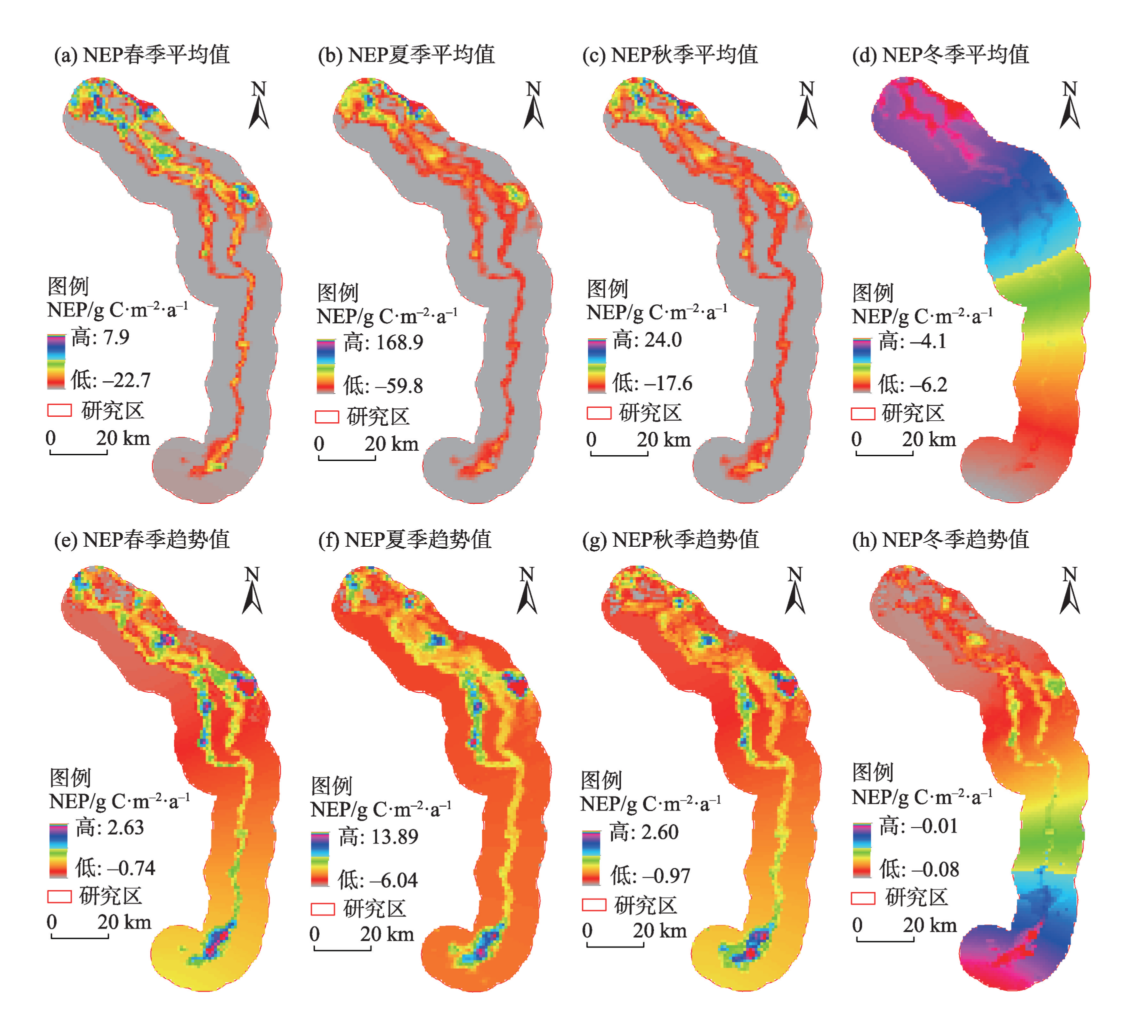


图3 2001—2019年各季节NEP均值及变化趋势空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of the mean value and change trend of NEP in the four seasons from 2001 to 2019

2.2 塔里木河下游植被碳源/汇变化

通过分析2001—2019年的年际碳汇面积,从整体来看,塔里木河下游碳汇区域有明显变大趋势,碳汇区向南逐渐扩大,说明生态输水促进了塔里木河下游地区碳源区向碳汇区的转变。2001—2010年,碳汇区域虽然表现为增加趋势,但增加区域不

明显。而从2011—2019年有较为明显的趋势变化，2012年英苏东南出现碳汇区域，尽管此区域在2007—2009年有少量的碳汇区域出现，但随即消失。在2012年台特玛湖附近首次出现碳汇区域，且逐年增加，说明在生态输水的末端台特玛湖生态环境有改善的趋势。进一步对塔里木河下游四季碳源/汇面积进行分析发现(图5)，塔里木河下游年平均碳汇面积为175 km^2。其中，春季碳汇面积为19 km^2，夏季碳汇面积最大，为109 km^2，秋季平均碳汇面积为47 km^2，而冬季无碳汇区域。结合生态输水资料发现：输水季节主要集中在夏秋季；此时，气温逐步回升，降水相对增加，生态输水对植被碳源汇

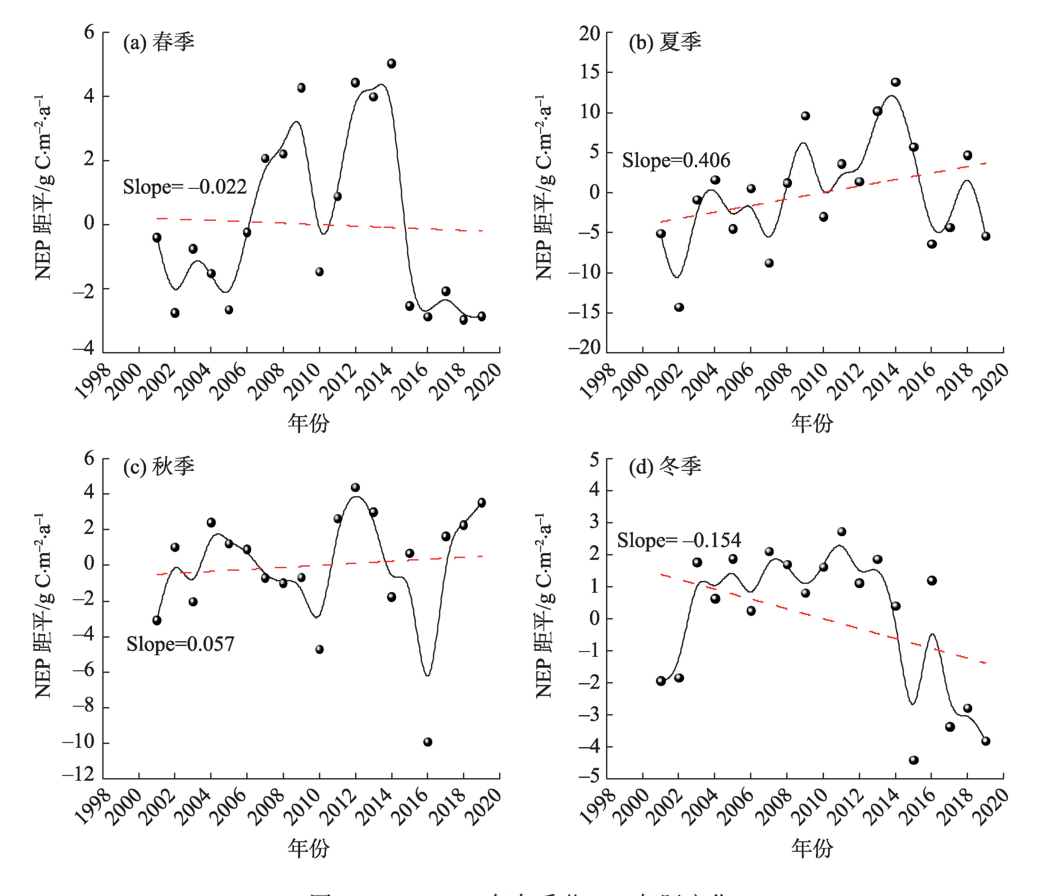


图4　2001—2019年各季节NEP年际变化

Fig. 4　Inter-annual changes of NEP in the four seasons from 2001 to 2019

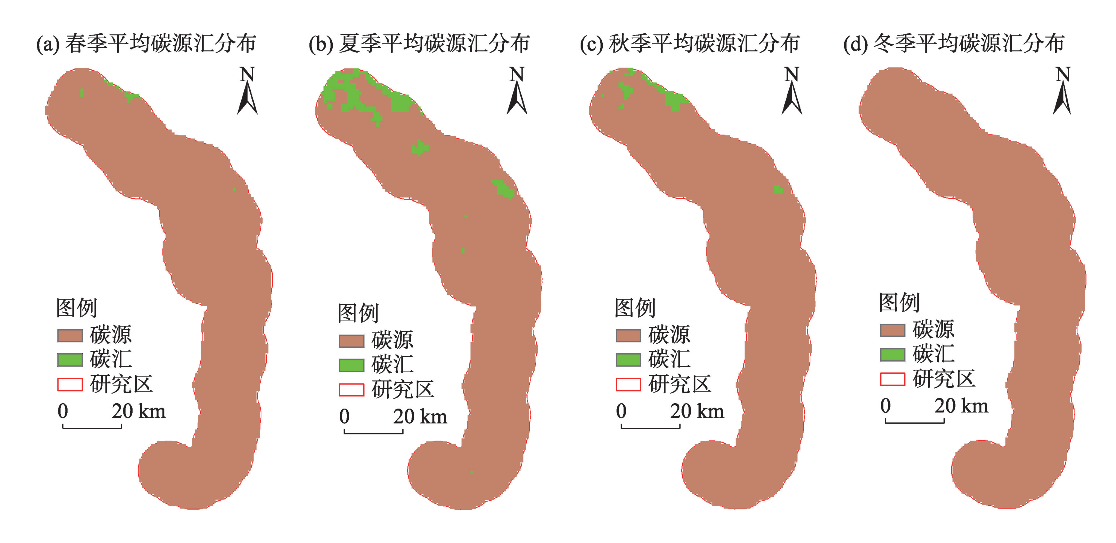


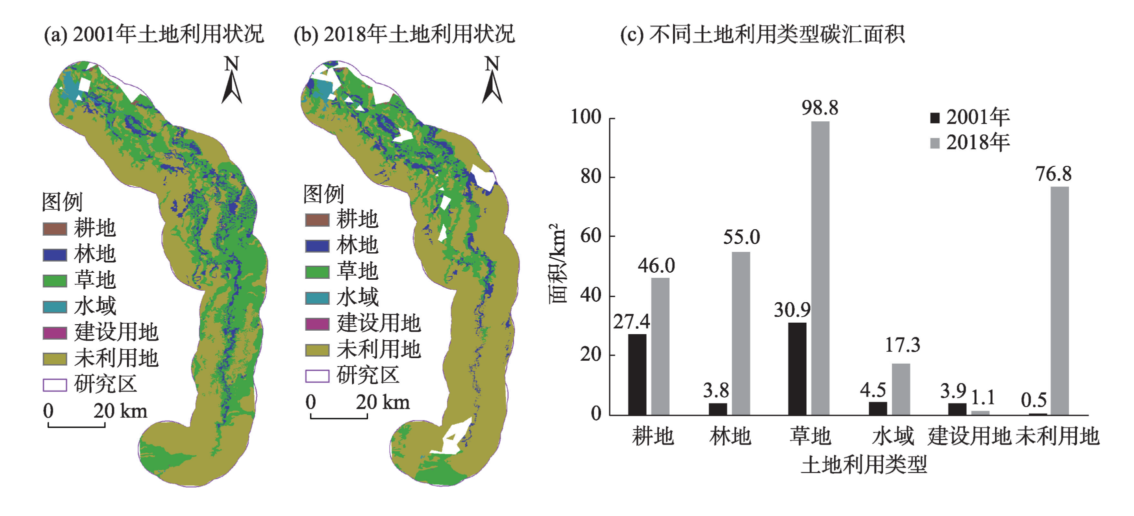
图5　2001—2019年塔里木河下游各季节碳源/汇均值分布

Fig. 5　Distributions of the average carbon sources/sinks in the lower reaches of Tarim River from 2001 to 2019

有较好的正反馈作用。生态输水对四季碳源影响显著，在输水频繁的夏秋季，碳汇面积亦较大，除季节因素外，输水时间与NEP四季均值和碳汇面积变化也有较好的对应关系。

2.3 土地利用/覆被变化影响下的NEP分布格局

多数研究表明土地利用变化是区域生态系统碳源/汇空间格局的影响因素之一。通过对塔里木河下游各土地利用碳源/汇面积(图6)分析发现经过生态输水后，塔里木河下游地区碳汇面积由2001年的71 km²增加到2018年的295 km²，其中草地碳汇面积增加最大，为3.57 km²·a⁻¹，林地碳汇面积增加2.69 km²·a⁻¹，耕地碳汇面积增加0.98 km²·a⁻¹，水域碳汇面积增加0.67 km²·a⁻¹，而建设用地碳汇面积减少0.15 km²。



注：图a、b内白色为碳汇区域分布。

图6 2001年和2018年不同土地利用类型的碳汇面积统计

Fig. 6 Carbon sink areas of different land use types in 2001 and 2018

随着塔里木河下游各土地利用碳汇面积的变化，塔里木河下游地区碳源面积也发生了相应的变化(表1)，其由2001年的4479 km²减少为2018年的4255 km²。具体而言，草地碳源面积变化最明显，减少了703.9 km²，其次是林地，碳源面积减少了32.4 km²，水域碳源面积减少了16.3 km²，未建设用地碳源面积减少了0.5 km²，而未利用地碳源面积增加528.8 km²，耕地碳源面积则增加0.3 km²。

表1 2001年和2018年不同土地利用类型的碳源面积统计

Tab. 1 Carbon source areas of different land use types in 2001 and 2018

土地利用类型	2001年碳源面积/km²	2018年碳源面积/km²	变化面积/km²	年平均变化/km²
耕地	7.9	8.2	0.3	0.016
林地	367.0	334.6	−32.4	−1.710
草地	1777.5	1073.6	−703.9	−37.050
水域	66.9	50.6	−16.3	−0.860
建设用地	0.6	0.1	−0.5	−0.026
未利用地	2259.1	2787.9	528.8	27.830
合计	4479.0	4255.0	−224.0	−11.790

2.4 生态输水对塔里木河下游植被碳源/汇的响应

2.4.1 生态输水对NPP的影响 NPP是引起NEP变化的最直接原因之一。NPP均值空间分布和年际变化表明(图7)，NPP增加的地区主要位于大西海子

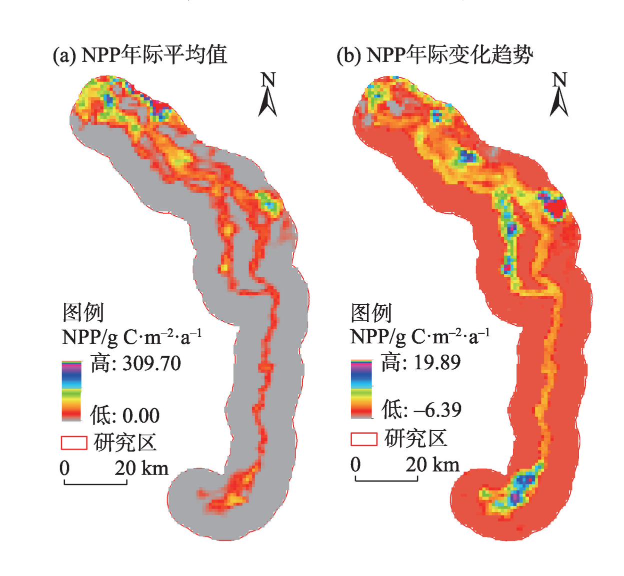


图7 2001—2019年NPP均值、变化趋势空间分布

Fig. 7 Spatial distributions of the mean value and change trend of NPP

水库东部和东南部以及英苏东南部等地区。NPP最小距平值出现在2001年，为−11.3 g C·m^{-2}·a^{-1}，最大距平值出现在2018年，值为13.3 g C·m^{-2}·a^{-1}。这表明生态输水对植被NPP有较大的影响作用。具体而言，近20 a来塔里木河下游NPP整体呈现上升趋势，增加面积占比50.12%，主要分布于大西海子水库、英苏、博孜库勒湿地、喀尔达依湿地以及台特玛湖附近。而在远离水体的其他地区，NPP大多为降低趋势。

2.4.2　生态输水对植被碳源/汇的影响　通过对比生态输水量与碳汇面积统计资料可以发现，生态输水促使了塔里木河下游碳汇面积的增加(图8)。在生态输水初期(2001—2010年)，碳汇区域虽有增加趋势，但增加量并不显著。自2011年起，随着生态输水量的增加，塔里木河下游碳汇面积显著，最大值可达350 km^2，这说明生态输水对于塔里木河下游地区生态环境的改善具有较好的作用效果，当NEP>300 g C·m^{-2}·a^{-1}时，被认为是高碳汇区域[30]。总体来看，塔里木河下游碳汇以低碳汇为主，对比2004、2008、2008、2013、2014、2019年的生态输水量与碳汇面积发现，生态输水约有1 a的滞后效应。

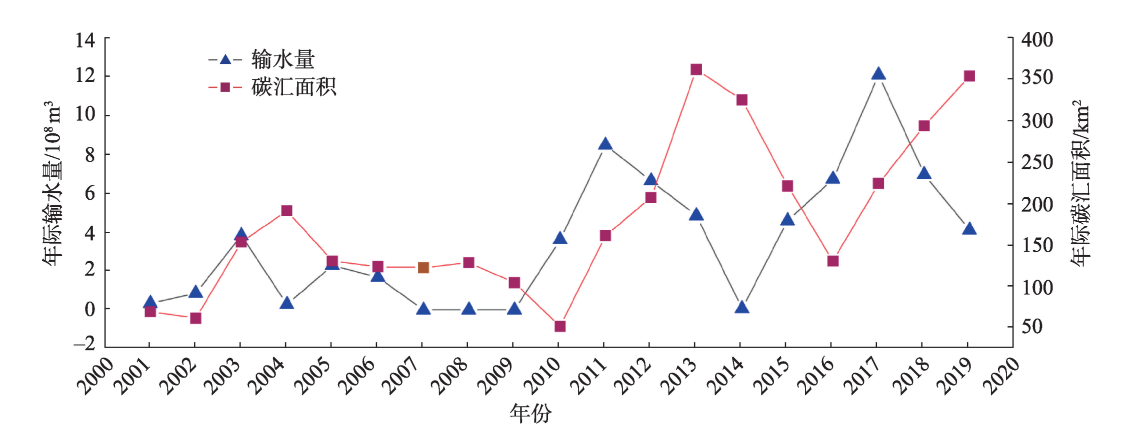


图8　2001—2019年塔里木河下游碳汇面积与输水量变化

Fig. 8　Changes of water delivery and carbon sinks area in the lower reaches of Tarim River from 2001 to 2019

为了定量探究输水量对塔里木河下游碳汇面积的影响程度，对累积输水量和碳汇面积进行线性拟合(图9)，发现二者有很强的相关性(R^2=0.95)，且数据点均在95%预测带内，说明随着塔里木河下游生态输水的加大，碳汇区域出现正向响应。

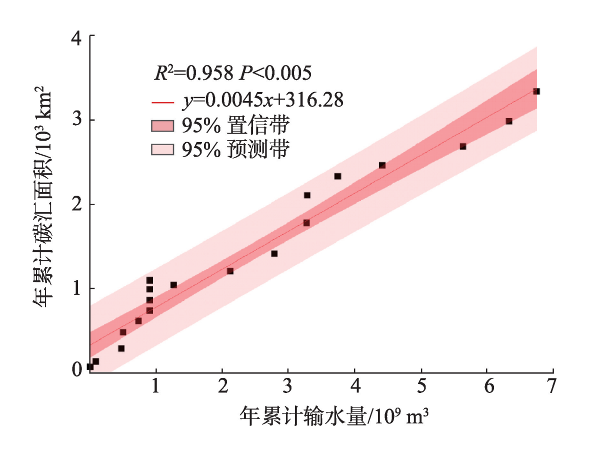


图9　2001—2019年塔里木河下游累计输水量与累计碳汇线性拟合

Fig. 9　Linear fitting of cumulative water delivery and cumulative carbon sinks in the lower reaches of Tarim River from 2001 to 2019

3　结　论

本文详细分析了2001—2019年塔里木河下游NEP的时空变化规律，探讨了塔里木河下游生态输水对植被碳/源汇时空格局的影响，主要结论如下：

(1) 近20 a来，塔里木河下游NEP整体呈现上升趋势，变化速率为0.541 g C·m^{-2}·a^{-1}，NEP增加的区域主要分布于塔里木河下游中部和南部地区。秋季和夏季NEP整体呈现上升趋势，平均变化速率分别为0.057 g C·m^{-2}·a^{-1}和0.406 g C·m^{-2}·a^{-1}，春季和冬季NEP则呈现下降趋势，平均变化速率分别为−0.022 g C·m^{-2}·a^{-1}和−0.154 g C·m^{-2}·a^{-1}。

(2) 塔里木河下游地区碳汇面积由2001年的71 km^{2}增加到2019年的355 km^2，碳汇面积从大到小变化依次为草地、林地、耕地、未利用地、水域、建设用地。年际输水量与年际碳汇面积变化存在约1 a的滞后效应，累计生态输水量与碳汇面积有很好的

线性关系。

本文在计算分析NEP的基础上，解析了塔里木河下游生态输水对生态系统碳源/汇的影响，研究结果表明近20 a来生态输水的生态效益可观。不足的是，遥感数据是反应区域某要素空间变化的最好手段，但同时本身也存在一定误差。另一方面CASA模型和R_H模型在区域尺度上有一定的适用性和差异性，在计算和分析NEP时存在一定程度难以避免的不确定性。因此，在计算和分析不同区域碳源/汇空间格局时应注意提高模型适用度和数据集精度。值得指出的是，塔里木河下游是以荒漠和稀疏植被为主体的地区，生态系统碳汇以低碳汇区为主要特征，加之分析结果具有较好的调查数据和数理统计佐证，分析结果表明塔里木河下游生态输水所带来的生态效益是可观的。

参考文献(References)

[1] 孙天瑶, 李雪梅, 许民, 等. 2000—2018年塔里木河流域植被覆盖时空格局[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 415-424. [Sun Tianyao, Li Xuemei, Xu Min, et al. Spatial-temporal variations of vegetation coverage in the Tarim River Basin from 2000 to 2018[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 415-424.]

[2] 王希义, 彭淑贞, 徐海量, 等. 大型输水工程的生态效益与社会经济效益评价——以塔里木河下游为例[J]. 地理科学, 2020, 40(2): 308-314. [Wang Xiyi, Peng Shuzhen, Xu Hailiang, et al. Evaluation of ecological and social-economic benefits of large water conveyance projects: A case study on the lower reaches of the Tarim River[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(2): 308-314.]

[3] 王让会, 孙洪波, 黄俊芳, 等. 人为活动影响下的生态系统反馈机制——塔里木河流域生态输水工程的效应分析[J]. 生态与农村环境学报, 2004, 20(4): 73-76. [Wang Ranghui, Sun Hongbo, Huang Junfang, et al. Ecosystem feedback mechanism under the influences of the human activities: Effect analysis of ecological water transfer engineering in Tarim River[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2004, 20(4): 73-76.]

[4] 王慧玲, 吐尔逊·哈斯木. 生态输水前后台特玛湖生态环境变化探究分析[J]. 生态科学, 2020, 39(1): 93-100. [Wang Huiling, Tursun Kasim. Exploration and analysis of ecological environment change of Tetma Lake before and after ecological water transfer[J]. Ecological Science, 2020, 39(1): 93-100.]

[5] 王雅梅, 张青青, 徐海量, 等. 生态输水前后台特玛湖植物多样性变化特征[J]. 干旱区研究, 2019, 36(5): 1186-1193. [Wang Yamei, Zhang Qingqing, Xu Hailiang, et al. Change of plant diversity in the Taitema Lake area before and after implementing the ecological water conveyance[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(5): 1186-1193.]

[6] 庄庆威, 吴世新, 罗格平, 等. 新疆绿洲变化与资源配置协调性分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(5): 1298-1306. [Zhuang Qingwei, Wu Shixin, Luo Geping, et al. Changes in oasis and coordination of resource allocation in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(5): 1298-1306.]

[7] 周亮, 朱彦儒, 孙东琪. 河西走廊城乡居民点空间分异特征及绿洲孕育度分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(1): 227-236. [Zhou Liang, Zhu Yanru, Sun Dongqi. Spatial differentiation characteristics and oasis breed degree of urban and rural residents in Hexi Corridor[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(1): 227-236.]

[8] 刘新华. 塔里木河流域强化水资源管理实践探索和成效浅析[J]. 陕西水利, 2019,(8): 32-34, 38. [Liu Xinhua. Practice exploration and effect analysis of strengthening water resources management in Tarim River Basin[J]. Shaanxi Water Resources, 2019, (8): 32-34, 38.]

[9] 郭红雨. 塔里木河下游生态输水工程对地下水位变化的影响分析[J]. 西北水电, 2020(5): 29-32. [Guo Hongyu. Analysis of the impact of the ecological water delivery project on the change of groundwater level in the lower reaches of the Tarim River[J]. Northwest Water Power, 2020(5): 29-32.]

[10] 陈亚宁, 张小雷, 祝向民, 等. 新疆塔里木河下游断流河道输水的生态效应分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2004, 34(5): 475-482. [Chen Yaning, Zhang Xiaolei, Zhu Xiangmin, et al. Analysis on ecological effect of water conveyance in the lower reaches of Tarim River in Xinjiang[J]. Science China: Earth Sciences, 2004, 34(5): 475-482.]

[11] 雍正, 赵成义, 施枫芝, 等. 近20年塔里木河干流区地下水埋深变化特征及其生态效应研究[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 182-189. [Yong Zheng, Zhao Chengyi, Shi Fengzhi, et al. Variation characteristics of groundwater depth and its ecological effect in the main stream of Tarim River in recent 20 years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(3): 182-189.]

[12] 薛联青, 符芳兵, 祝薄丽, 等. 塔里木河流域下游绿洲演变对生态输水的响应[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(4): 310-316. [Xue Lianqing, Fu Fangbing, Zhu Boli, et al. Response of oasis evolution to ecological water transport in the downstream of Tarim River Basin[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(4): 310-316.]

[13] 徐俏, 叶茂, 徐海量, 等. 塔里木河下游生态输水对植物群落组成、多样性和稳定性的影响[J]. 生态学杂志, 2018, 37(9): 57-64. [Xu Qiao, Ye Mao, Xu Hailiang, et al. Effects of ecological water conveyance on the composition, diversity and stability of plant community in the lower reaches of Tarim River[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(9): 57-64.]

[14] 赵振勇, 王让会, 张慧芝, 等. 塔里木河下游荒漠生态系统退化机制分析[J]. 中国沙漠, 2006, 26(2): 220-225. [Zhao Zhenyong, Wang Ranghui, Zhang Huizhi, et al. Degradation mechanism of desert ecosystem in lower reaches of Tarim River[J]. Journal of Desert Research, 2006, 26(2): 220-225.]

[15] 王希义, 徐海量, 闫俊杰, 等. 基于氧同位素(δ~^{18}O)的塔里木河下游河水向地下水的转化研究[J]. 水资源与水工程学报,

2018, 29(2): 84−89. [Wang Xiyi, Xu Hailiang, Yan Junjie, et al. Conversion of river water to groundwater based on oxygen isotope (δ~[18]O) in the lower reaches of Tarim River[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(2): 84−89.]

[16] 刘迁迁, 古力米热·哈那提, 王光焰, 等. 间歇性生态输水塔里木河下游断面地下水位变化模拟[J]. 生态学报, 2018, 38(15): 5519−5528. [Liu Qianqian, Gulimire Hanati, Wang Guangyan, et al. Simulation of sectional groundwater level variation in the lower reaches of Tarim River under intermittent ecological water conveyance[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(15): 5519−5528.]

[17] 廖淑敏, 薛联青, 陈佳澄, 等. 塔里木河生态输水的累积生态响应[J]. 水资源保护, 2019, 35(5): 120−126. [Liao Shumin, Xue Lianqing, Chen Jiacheng, et al. Cumulative ecological response of ecological water transmission in Tarim River[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(5): 120−126.]

[18] 汪亮亮, 张同刚, 叶茂, 等. 基于线性趋势外推和GM(1,1)模型预测塔里木河下游胡杨年轮径向生长变化[J]. 中南林业科技大学学报, 2018, 38(4): 87−94. [Wang Liangliang, Zhang Tonggang, Ye Mao, et al. Prediction of the radial growth of *Populus euphratica* in Tarim River downstream based on linear trend extrapolation and GM (1, 1) model[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2018, 38(4): 87−94.]

[19] 谭克龙, 王晓峰, 高会军, 等. 塔里木河流域综合治理生态要素变化的遥感分析[J]. 地球信息科学学报, 2013, 15(4): 604−610. [Tan Kelong, Wang Xiaofeng, Gao Huijun, et al. Analysis of ecological elements of comprehensive harnessing in Tarim River Basin using remote sensing[J]. Journal of Geo-Information Science, 2013, 15(4): 604−610.]

[20] 常顺利, 杨洪晓, 葛剑平. 净生态系统生产力研究进展与问题[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2005(5): 517−521. [Chang Shunli, Yang Hongxiao, Ge Jianping, et al. Advance and questions in net ecosystem production[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2005(5): 517−521.]

[21] 古力米热·哈那提, 张音, 关东海, 等. 生态输水条件下塔里木河下游断面尺度地下水流数值模拟[J]. 水科学进展, 2020, 31(1): 61−70. [Gulimire Hanati, Zhang Yin, Guan Donghai, et al. Numerical simulation of groundwater flow at cross-section scale in the lower reaches of Tarim River under the condition of ecological water conveyance[J]. Advances in Water Science, 2020, 31(1): 61−70.]

[22] 刘纪远. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1996. [Liu Jiyuan. Macro-scale survey and dynamic study of natulral resources and environment of China by remote sensing[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 1996.]

[23] Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data[J]. Global Biogeochemical Cycles. 1993, 7(4): 811−841.

[24] 潘竟虎, 李真. 2001—2012年西北干旱区植被净初级生产力时空变化[J]. 生态学杂志, 2015, 34(12): 3333−3340. [Pan Jinghu, Li Zhen. Temporal-spatial change of vegetation net primary productivity in the arid region of northwest China during 2001 and 2012[J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(12): 3333−3340.]

[25] 李传华, 周敏, 王玉涛, 等. 西北干旱区植被净初级生产力年际变化及其时空和气候因子的贡献——以河西走廊为例[J]. 生态学杂志, 2020, 39(10): 3265−3275. [Li Chuanhua, Zhou Min, Wang Yutao, et al. Inter-annual variation of vegetation net primary productivity and the contribution of spatial-temporal and climate factors in arid northwest China: A case study of Hexi Corridor[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(10): 3265−3275.]

[26] 和清华, 谢云. 我国太阳总辐射气候学计算方法研究[J]. 自然资源学报, 2010, 25(2): 308−319. [He Qinghua, Xie Yun. Research on the climatological calculation method of solar radiation in China [J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(2): 308−319.]

[27] 朱文泉, 潘耀忠, 龙中华, 等. 基于GIS和RS的区域陆地植被NPP估算——以中国内蒙古为例[J]. 遥感学报, 2005, 9(3): 300−307. [Zhu Wenquan, Pan Yaozhong, Long Zhonghua, et al. Estimating net primary productivity of terrestrial vegetation based on GIS and RS: A case study in Inner Mongolia, China[J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(3): 300−307.]

[28] Pei Z Y, Ouyang H, Zhou C P, et al. Carbon balance in an alpine steppe in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2010, 51(5): 521−526.

[29] 刘春雨. 省域生态系统碳源/汇的时空演变及驱动机制——以甘肃省为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2015. [Liu Chunyu. The temporal-spatial changes and dynamic mechanism of carbon source/sink of provincial ecosystem: A case of Gansu Province[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015]

[30] 贠银娟, 赵军. 基于MODIS-NDVI数据的植被碳汇空间格局研究——以石羊河流域为例[J]. 山地学报, 2018, 36(4): 644−653. [Yun Yinjuan, Zhao Jun. Spatial pattern of vegetation carbon sinks based on MODIS-NDVI data: A case study in Shiyang River Basin, China[J]. Mountain Research, 2018, 36(4): 644−653.]

Effects of ecological water conveyance on the spatial pattern of vegetation carbon sources/sinks in the lower reaches of Tarim River

WANG Chuan[1,2], LIU Yongchang[1,2], LI Zhi[1]

(1. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The net ecosystem productivity (NEP) of vegetation in the lower reaches of Tarim River, Xinjiang, China from the year 2000 was estimated using data of ecological water conveyance, meteorology, land use/cover changes combined with the modified Carnegie-Ames-Stanford approach (CASA) mode and soil microbial respiration models (R_H). The spatial distribution of vegetation carbon sources/sinks was analyzed, and the effect of ecological water conveyance on changes in these sources/sinks in the lower reaches of Tarim River was discussed. Results showed that (1) ecological water conveyance to the lower reaches of Tarim River since 2000 has allowed the degraded ecosystem in this area to recover to a certain extent. In addition, the vegetation carbon sinks in the area showed an increasing trend. Specifically, from 2001 to 2019, NEP showed an increase rate of 0.541 g C·m^{-2}·a^{-1}. The maximum increase rate, which was 0.406 g C·m^{-2}·a^{-1}, was observed in summer. The areas in which the carbon sinks increased were mainly located in northern Daxihaizi Reservoir, Yingsu, Bozikule Wetland, Kaldayi Wetland, and Taitma Lake. The area of vegetation carbon sinks increased by four times from 71 km^2 in 2001 to 355 km^2 in 2019. (2) In terms of seasonal variation, the carbon sink area measured 109 km^2 in summer. Indeed, this season contributed the largest to the total carbon sink area among the four seasons, followed by spring and autumn. No obvious carbon sink areas were noted in winter. (3) Changes in the total carbon sink area of different ecosystems showed the order grassland>woodland>cultivated land>unused land>water area>construction land. The annual average change rates of the carbon sink areas in woodland and grassland, at 2.69 km^2·a^{-1} and 3.57 km^2·a^{-1}, respectively, were higher than those of any of the other ecosystems. A good linear relationship between ecological water conveyance and carbon sink area was observed, and changes in carbon sink area indicated a lag effect of approximately 1 year.

Key words: ecological water conveyance; carbon sources/sinks; net ecosystem productivity (NEP); the lower reaches of Tarim River